



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Sands cykliske styrke

Ibsen, Lars Bo

Published in:

NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992

Publication date:

1992

Document Version

Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Ibsen, L. B. (1992). Sands cykliske styrke. I *NGM-92 : Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde, Aalborg, 28-30 Maj 1992: Artikler til NGM-92: Session 1-4* (Bind 1/3, s. 107-112). Dansk Geoteknisk Forening. DGF-bulletin Nr. 9

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

M37.

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

Vol 1 / 3

Artikler til NGM-92: Session 1-4

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING

NGM-92

11. NORDISKE GEOTEKNIKERMØDE
AALBORG, 28-30 MAJ 1992

Vol 1 / 3

Artikler til NGM-92: Session 1-4

Maj 1992
dgf-Bulletin

9



**DANISH GEOTECHNICAL SOCIETY
DANSK GEOTEKNISK FORENING**

Sands cykliske styrke

Af

Lars Bo Ibsen, Aalborg Universitetscenter

RESUME

Sands cykliske styrke kan beskrives ved Cyclic Liquefaction, Mobilisering, Stabilization og Instant Stabilization. I artiklen beskrives hvorfor Stabilization og Instant Stabilization ikke observeres, når sands udrænedes styrke undersøges i triaxial celler, der anvender prøver med dobbelt prøvehøjde.

INDLEDNING

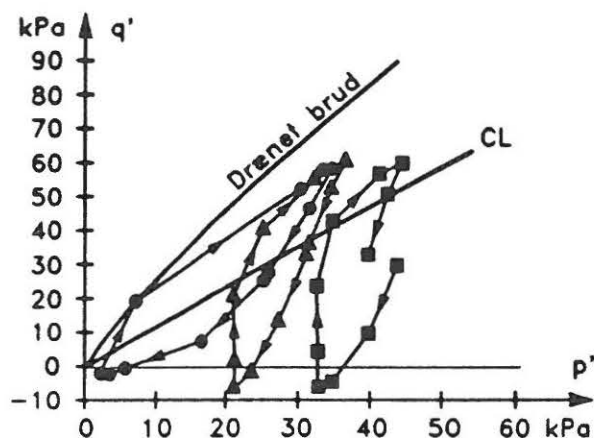
Siden Seed og Lee i 1966 publicerede deres berømte artikel "LIQUEFACTION OF SATURATED SANDS DURING CYCLIC LOADING", har størstedelen af forskningen inden for sands cykliske styrke bestået i at fastlægge risikoen for og modstanden mod Cyclic Liquefaction og Cyclic Mobility. Disse fænomener observeres ved cykliske triaxialforsøg med dobbelt prøvehøjde og er skitseret i figur 5. Cyclic Liquefaction og Cyclic Mobility anses for at beskrive den samme tilstand, nemlig en udrænet brudtilstand, der skyldes poretryksopbygningen, og som resulterer i store cykliske deformationer.

Da kræfter, deformationer og poretryk ved et triaxialforsøg bestemmes ved overflademålinger, er det vigtigt, at der optræder homogene spændings- og tøjningstilstande i prøven gennem hele forsøget. Dette opnåes kun, hvis der anvendes glatte trykhoveder og en prøve, hvor højden er lig diametren, /Jacobsen 1970/, /Lade 1982/. Ved at undersøge sands cykliske styrke på prøver med højde lig diametren og glatte trykhoveder, er der fundet flere typiske *Fænomener*, dvs. karakteristiske forløb af den effektive spændingsvariation end observeret tidligere, /Lars Bo Ibsen 1992/, se figur 1. Fænomenerne kan inddeles i to grupper, *Poretryksopbygning og Stabilisering*.

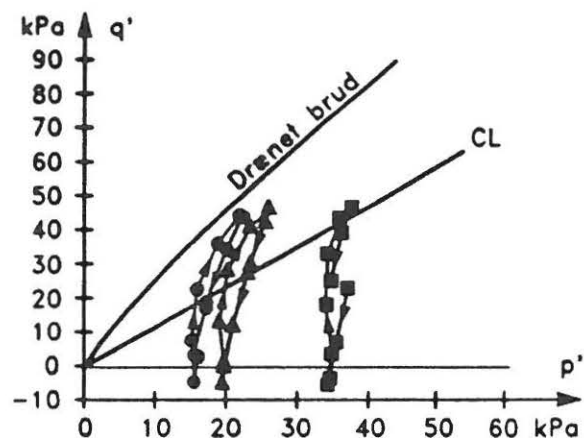
Poretryksopbygningen er karakteriseret ved at der ved den cykliske belastning af prøver, med forskellige initiale forskydningsspændinger, opbygges poreovertryk, og de effektive spændinger falder.

Gruppen består af fænomenerne, der i figur 1 klassificeres som Cyclic Liquefaction 1.a og Mobilisering 1.b.

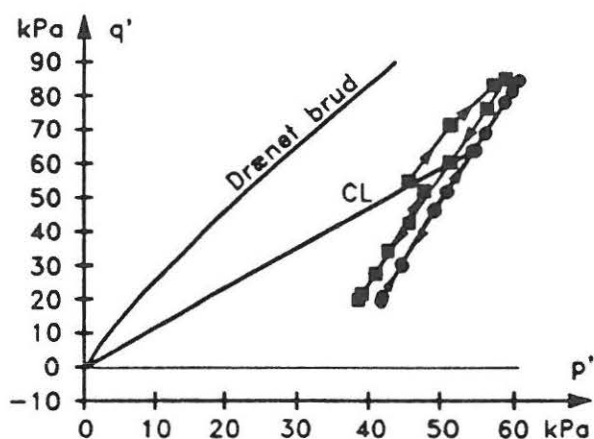
Stabilisering er karakteriseret ved at der ved den cykliske belastning af prøver, med forskellige initiale forskydningsspændinger, opbygges negativt poretryk, hvorved de effektive spændinger stiger.



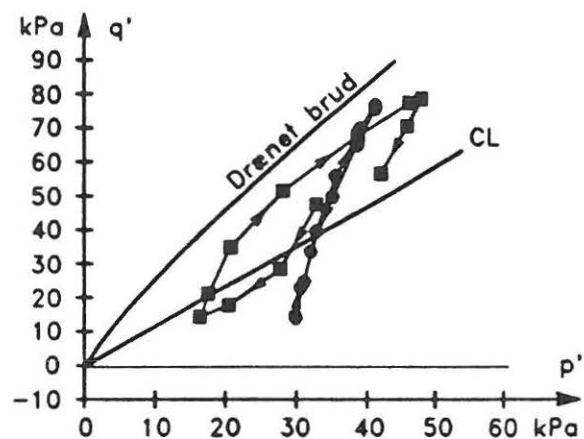
■ Cyk. nr.2 ▲ Cyk. nr.10 ● Cyk. nr.31



■ Cyk. nr.2 ▲ Cyk. nr.40 ● Cyk. nr.312



■ Cyk. nr.1 ● Cyk. nr.1285



■ Cyk. nr.1 ● Cyk. nr.1285

Figur 1: Sands udrændede opførsel under cyklisk belastning kan beskrives ved a) Cyclic Liquefaction, b) Mobilisering, c) Stabilization og d) Instant Stabilization. Udviklingen i de effektive spændinger er vist ved udvalgte cykler, angivet ved forskellig signatur.

Gruppen består af fænomener, der klassificeres som Stabilization 1.c og Instant Stabilization 1.d.

Ved at klassificere forsøgsresultaterne i poretryksopbygning og stabilisering har det været muligt at fastlægge eksistensen af en *Stabil Cyklisk Tilstand* /M.Jacobsen, L.B.Ibsen 1991/. Tilstanden er karakteristisk ved, at der forefindes en ligevægt mellem tilvæksten i poretryk ved belastning og reduktionen af poretryk ved aflastning. Er den stabile cykliske tilstand

indtrådt, se figur 1.b - 1.d, kan prøven påføres uendelig mange cykliske belastninger, uden at den gennemsnitlige effektive middelspænding ændres. Opdagelsen af den stabile cykliske tilstand bevirker at grundopfattelsen af, at vekslende belastninger altid vil føre til brud i form af Cyclic Liquefaction eller Cyclic Mobility, hvis amplituden eller antallet af cykliske belastninger er tilstrækkelig stor /Castro 1975/, må ændres. Cyklisk brud i form af Cyclic Liquefaction eller Cyclic Mobility forekommer kun, hvis spændingsamplituden er så stor, at den drænedes brudbetingelse nås, før den stabile tilstand indtræder /M.Jacobsen, L.B.Ibsen 1991/.

I artiklen beskrives, hvorfor den stabile cykliske tilstand ikke indtræder, når poretryks-opbygningen undersøges ved cykliske triaxialforsøg på prøver med dobbelt prøvehøjde.

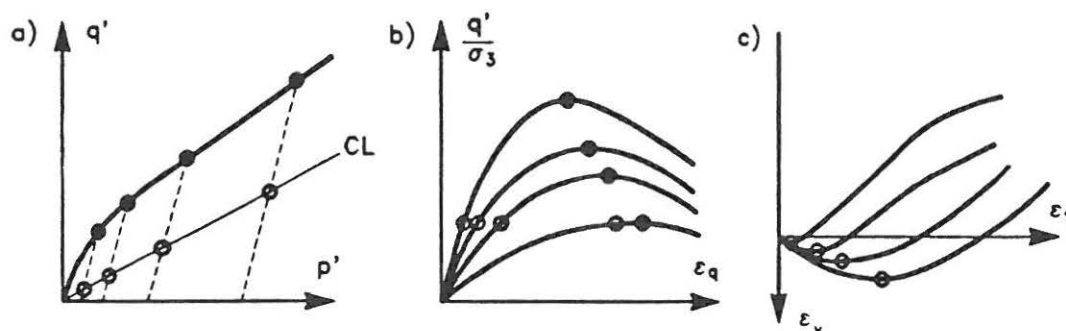
Artiklen er baseret på triaxialforsøg udført på en velsorteret sand kaldet Lund No. 0. Sanden består hovedsagligt af nedknust materiale med middel-diameter $d_{50} = 0.4$ mm og uensformighedstal $U = 1.7$. Prøverne tildannes ved at tørt sand inddrysse i en sandform. Ved at anvende denne metode fås en homogen udlejret prøve. Prøverne er udlejret med $e = 0.61$, svarende til $I_D = 0.78$, og skånsomt vandmættet under vakuum.

DEN KARAKTERISTISKE TILSTAND

I figur 2 ses resultatet af fire drænedes triaxialforsøg, hvor kammertrykket er holdt konstant gennem hele forsøget, såkaldte CD-forsøg. De observerede brudværdier viser, at sandet har en krum brudbetingelse. Arbejdskurverne i figur 2b er gjort dimensionsløse ved division med σ'_3 , hvad der får de kurver, der svarer til det mindste kammertryk til at ligge øverst. Brud, der er markeret med udfyldte cirkler, ses at være veldefineret. Figur 2c viser volumenændringen ϵ_v som funktion af ϵ_1 . Det ses, at hvert forsøg begynder med formindskelse af volumenet og slutter med en forøgelse. Den spændingstilstand, hvor volumenændringen skifter fra formindskelse til forøgelse, er karakteriseret ved at $\delta\epsilon_v = 0$. Spændingstilstanden er vist med åbne cirkler og betegnes *Den Karakteristiske Tilstand* /Luong 1980/. Indtegnes disse tilstande på figur 2a, udgør de en ret linie gennem 0,0. Linien betegnes *Den Karakteristiske Linie CL* /Luong 1980/, og inddeler tilstandsrummet i to

Under linien er der volumenformindskelse, dvs. prøven kontraherer og $\delta\epsilon_v > 0$.

Mellem linien og brudbetingelsen er der volumenforøgelse, dvs. prøven dilaterer og $\delta\epsilon_v < 0$.



Figur 2: I figuren er skitseret fire drænedes triaxialforsøg. Forsøgene illustrerer udviklingen ved CD-forsøg udført på sand ved forskellige kammertryk.

Den karakteristiske tilstand er et udtryk for materialets *Indre Friktionskapacitet*, der udvikles ved at de enkelte korn glider på hinanden, hvorved prøven kontraherer. Den indre friktionskapacitet udvikles ved ren friktion mellem kornene og er derfor kun afhængig af normalspændingen, der forefindes i glidefladerne mellem de enkelte korn. Lejringsstætheden har ingen indflydelse på størrelsen af den indre friktionskapacitet, idet en løst lejret prøve har færre kontaktpunkter i kornstrukturen end en fast lejret. Påføres prøverne samme belastning, vil kontaktrykket mellem de enkelte korn derfor være størst ved den løst lejrede prøve. Normalspændingerne i glidefladerne er derfor højere og kan mobilisere større friktion end i kontaktpunkterne ved den faste lejrings. Prøverne med forskellige relative lejringsstætheder kan derfor bære samme belastning, før de begynder at dilatere.

Bevægelsen i kornstrukturen skifter imidlertid radikalt, når sandens indre friktionskapacitet overskrides. Under kontraktionen i prøven, glider de enkelte korn på hinanden, mens de under dilatationen skifter pladser. Når der herved kommer bevægelse i kornstrukturen, har lejringsstætheden stor betydning for brudbetingelsen, idet der under dilatation skal større energi til at flytte et korn i en kompakt kornstruktur end i en løs. Dilatationen bevirker, at brudbetingelsen bliver krum.

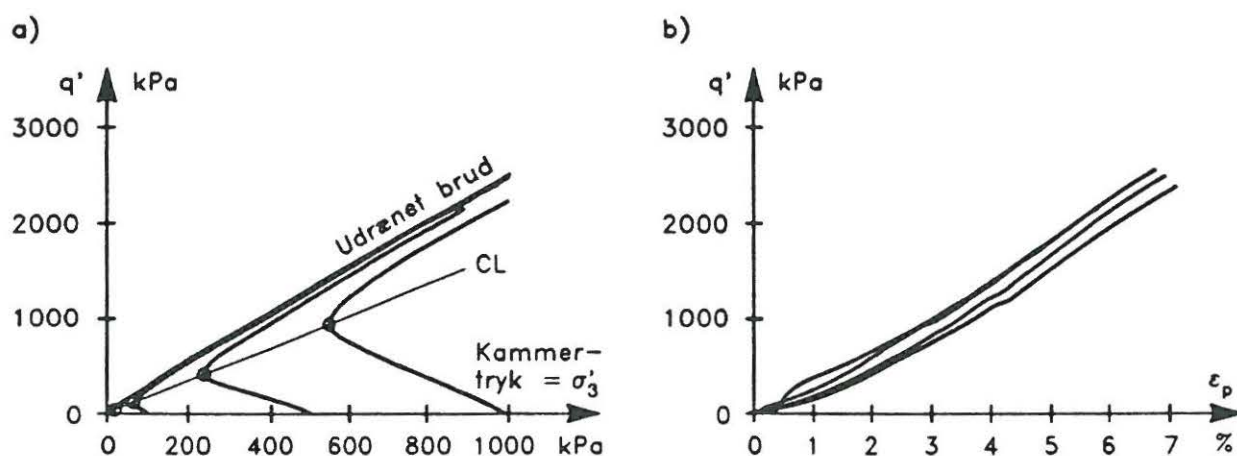
Den karakteristiske tilstand ved $CU_{u=0}$ forsøg

I figur 3 ses fire udrænedes triaxialforsøg udført på prøver, hvor højden er lig diameteren. I figuren er den karakteristiske linie indtegnet, og det fremgår, at spændingstilstanden hvor $\delta u = 0$, markeret med en cirkel, er identisk med spændingstilstanden hvor $\delta \epsilon_v = 0$ under drænedes betingelser. Der eksisterer derfor følgende kobling mellem prøvens volumenændring i drænet tilstand og poretryksudviklingen i udrænet tilstand.

Kontraktion $\delta \epsilon_v > 0$, resulterer under udrænedes betingelser i $\delta u > 0$.

Dilatation $\delta \epsilon_v < 0$, resulterer under udrænedes betingelser i $\delta u < 0$.

Alle forsøgene ses i figur 3.a at konvergere mod et fælles spændingsforløb, der normalt betegnes "udrænet brud". Af arbejdskurverne i figur 3.b fremgår det imidlertid, at denne



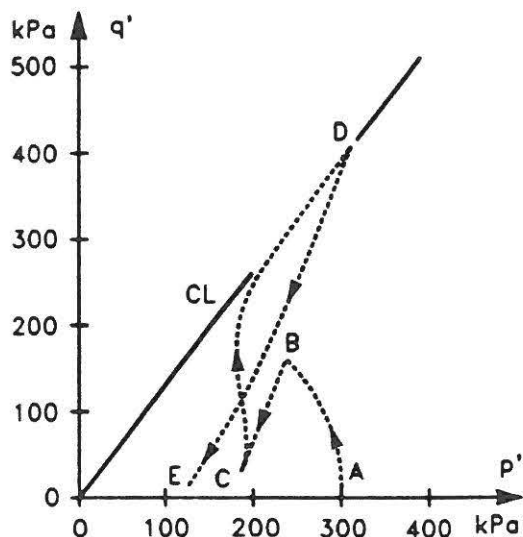
Figur 3: Spændings- og tøjningsforløb bestemt ved 4 $CU_{u=0}$ forsøg.

fælles spændingsvej ikke repræsenterer en brudtilstand. Spændingsvejen forløber i den del af spændingsrummet, hvor sandet ønsker at dilatere og $\delta u < 0$. Som ved de drænedes forsøg bevirker dette, at den fælles spændingsvej bliver krum.

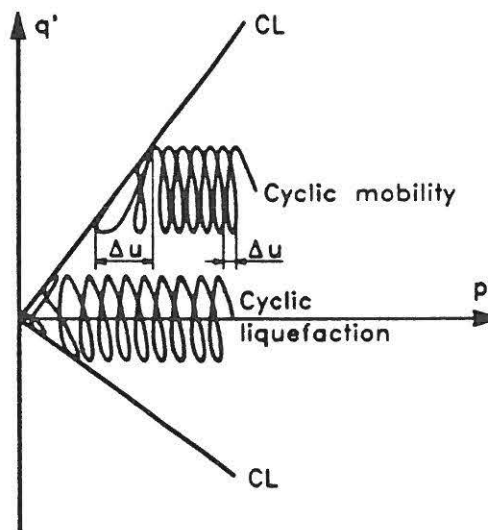
Idet den fælles spændingsvej ikke er en brudtilstand, kan den ikke beskrive udviklingen af cyklisk brud. Cyklisk brud udvikles, når spændingsvariationen følger den drænedes brudbetingelse, se figur 1.a.

Udrænedes forsøg udført på prøver med dobbelt prøvehøjde

Udføres triaxialforsøg på en ustabil jordart med dobbelt prøvehøjde, vil brud og deformationerne udvikles i en smal brudzone, der deler prøven i to stive legemer. Volumentøjningen er ikke homogent fordelt i prøven, men koncentreret omkring brudzonen. Når kornene i zonen begynder at dilatere, suges vand fra de tilstødende dele af prøven dertil, og der forekommer lokal dræning i prøven. /M. Jacobsen 1981/. Poretrykket, der i udrænet tilstand skal modsvare dilationen, kan således ikke genereres, og spændingsvejen kan på grund af den lokale dræning ikke forløbe i den del af spændingsrummet, hvor sandet ønsker at dilatere, som ved forsøgene i figur 3. Udføres forsøget udrænet, vil spændingsvejen derfor følge den karakteristiske linie, når denne nås, se figur 4. Den udrænedes brudbetingelse anses normalt for at være ret og gå gennem 0,0, se fx /Luong 1980/. Dette stemmer overens med, at spændingsvejen ved udrænedes triaxialforsøg, udført på dobbelt prøvehøjde, følger den karakteristiske linie.



Figur 4: $CU_{u=0}$ forsøg udført på prøver med dobbelt prøvehøjde /Luong 1980/.



Figur 5: Fænomener der observeres ved cykliske triaxialforsøg med dobbelt prøvehøjde /Luong 1980/.

I figur 5 ses de to spændingsforløb, der observeres ved cykliske triaxialforsøg med dobbelt prøvehøjde. Det ses, at når de effektive spændingsvariationer på grund af poretryksopbygningen får kontakt med den karakteristiske linie, følger spændingsforløbet, både ved

Cyclic Liquefaction og Cyclic Mobility, denne linie. Forskellen mellem de to spændingsforløb er, at poretryksopbygningen ved cyklisk liquefaction kan blive lig kammertrykket, idet spændingsvariationen passerer $q' = 0$, hvorved brudtilstanden udvikles hver gang $p' = 0$. Det eneste punkt hvor den drænede og udrænede brudbetingelse er sammenfaldende. Ved Cyclic Mobility kan poretrykket maksimalt reducere de effektive spændinger svarende til spændingsniveauer ved den karakteristiske tilstand. Det effektive spændingsforløb, der i figur 5 betegnes Cyclic Mobility, er ingen brudtilstand, idet spændingsvariationen følger den karakteristiske linie. De cykliske tøjninger, der observeres under udviklingen af Cyclic Mobility /Castro 1975/ skyldes, at det cykliske poretryk u_{cyk} er stigende gennem forsøget, se figur 5. Når spændingsvariationen følger den karakteristiske tilstand, vil u_{cyk} ved samme spændingsamplitude således være større end det cykliske poretryk, der kan udvikles ved cyklisk liquefaction.

KONKLUSION

Brud under cyklisk belastning anses normalt styret af den statiske "udrænede brudbetingelse". Ved udrænede forsøg på dobbelt prøvehøjde observeres, at spændingsforløbet ved statisk og cyklisk belastning går mod samme spændingsvej i tilstandsrummet. I artiklen er det vist, at denne fælles spændingsvej ikke udgør en brudtilstand i sand, men er identisk med Den Karakteristiske Linie defineret af /Luong 1980/. Den Karakteristiske Linie kan ikke overskrides idet poretrykket, der i udrænnet tilstand skal modsvare dilation, ikke kan genereres, når forsøgene udføres på prøver med dobbelt prøvehøjde. Dette medfører, at fænomenerne Stabilization og Instant Stabilization ikke kan udvikles og Cyclic Mobility oftest udvikles i stedet for Mobilisering. Udføres de cykliske forsøg på prøver, hvor højden er lig diametren ses, at brud under cyklisk belastning udvikles, når den statiske drænede brudbetingelse nås. Studiet af fænomenet, der relaterer sig til sands cykliske styrke, bør derfor kun studeres i en triaxialcelle, hvis der anvendes prøver, hvor højden er lig med diametren.

REFERENCER

- Castro, G.(1975): Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, Vol. 101, No GT6, June, 1975.
- Ibsen L.B.(1992): Poretryksopbygning i sand. *Ph.D.-afhandling*.
- Jacobsen M.(1970): New Oedometer and New Triaxial apparatus for firm soil, DGI Bulletin No 27 p.7 .
- Jacobsen M.(1981): Two Comments on Laboratory Test. X ICSMFE Stockholm 1981 .
- Jacobsen M, Ibsen L.B (1991): Development of Pore Pressure and Material Damping During Cyclic Loading. X. ECSMFE, Firenze, May 1991 .
- Lade P.V (1982): Localization effects in triaxial test on sand. IUTAMConference on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft 31 Aug.-3 Sept. 1982.
- Luong M.P (1980): Stress-strain aspects of cohesionless soil under cyclic and transient loading. Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading. Swansea, Jan. 1980.